

## 소나무 風媒次代苗의 家系間 오존에 대한 敏感性 反應

李在千 · 吳昌泳 · 韓心熙 · 金張秀

국립산림과학원 산림유전자원부

### Response of Ozone Sensitivity in Open-Pollinated Families of *Pinus densiflora* Seedlings

Jae-Cheon Lee, Chang-Young Oh, Sim-Hee Han and Jang-Su Kim

Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

**요 약:** 본 연구는 우리나라 소나무 90가계를 대상으로 오존에 대한 민감성을 비교하기 위하여 인공광형 생장상에서 100 ppb의 오존을 5개월간 처리하였다. 잎의 가지적 피해, 근원경 생장 및 개체건중량 등을 조사하였다. 잎의 가지적 피해는 내성그룹이 1.9%인 반면 민감성 그룹은 15.2%로 나타났다. 상대근원경 생장비는 내성그룹이 12% 생장한 반면, 민감성 그룹은 23%의 생장 감소를 보였다. 개체 건중량에서도 내성그룹은 17%의 증가를 보였으나 민감성 그룹에서는 33%의 감소를 보였다. 수체 부위별로는 뿌리부분이 가장 민감한 반응을 보였다. 모든 조사 요인을 표준화한 결과 강원 4, 16, 26, 27, 73호가 오존에 대한 내성 가계로 나타났고, 강원 40, 52, 83, 경기 1, 경북 20호 등이 민감한 가계로 나타났다. 이와 같이 가계수준에서 그룹간에 민감성의 차이로 보아 오존에 대한 유전적 변이를 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과로 오존에 대한 가지적 피해가 상대적으로 적고, 근원경 생장과 건중량의 감소율이 낮은 내성그룹이 확인되었다.

**Abstract:** This studies were conducted to compare ozone sensitivity among half-sib families of Japanese red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.). 90 families were exposed in walk-in type chambers to charcoal-filtered air and 100 ppb ozone for 8 hours daily, 5 consecutive months. We surveyed the foliar injury, Relative DRC (diameter at root collar) growth and relative dry weight after fumigation. After 5 months of exposure, foliar injury ranged from 1.9% at tolerant group to 15.2% at sensitive group. Relative DRC growth rates showed increased 12% at tolerant group, but reduced 23% at sensitive group. Total dry weight increased 17% at tolerant group, otherwise reduced by 33% at sensitive group, relative to the control. The root biomass showed more sensitive than the other part biomass. On the basis of the results of these screening studies, families Kangwon 04, 16, 26, 27 and 73 were determined to be tolerant; Kangwon 40, 52, 83, Gyeonggi 01 and Gyeongbuk 20 to be sensitive to ozone. Considerable genetic variation in ozone responses occurred, as shown by differences in sensitivities among families and among groups. These results indicate that tolerant groups of *P. densiflora* exhibited a high degree of resistance to ozone pollution injury.

**Key words :** *Pinus densiflora*, ozone sensitivity, foliar injury, relative growth, dry weight, open-pollinated family

## 서 론

대기권의 오존이 수목에 미치는 영향은 1950년대 후반과 1960년대 초반 미국 California 남부지역에서 ponderosa pine의 생장둔화 원인의 주범을 오존으로 추정된 보고가 최초였으며, 이후 산림 내 임목의 활력에 영향을 미치는 대기오염원 중 단일오염원으로는 가장 치명적인 물질로 알려져 왔다(Skelly, 1980).

오존의 유해성을 밝히기 위한 연구는 북아메리카나 유럽 등을 중심으로 자국 내에서 경제적으로 주요한 수종을 대상으로 집중적인 연구가 수행되어왔다. 피해증상으로 Berry(1963)가 *Pinus strobus* 잎의 가지적 피해를 보고한 이후 구체적으로 침엽길이의 감소, 황색반점, 황색줄무늬, 잎 끝 마름 등이 보고되었다(Hayes와 Skelly, 1977). 오염 지역에서 개체간의 변이나, 가지적 피해가 생장에 영향을 미치는 결과는 미국 테네시주의 *Pinus strobus* 25년생 임분에서 잎의 피해가 없는 개체들이 피해가 심한 개체보다 수고생장에서 3배, 직경생장에서 2배의 차이가 확인되었

\*Corresponding author  
E-mail: jaeclee99@foa.go.kr

으며, 직경생장 감소와 잎의 가시적 피해가 밀접한 상관 이 있다는 사실도 보고되었다(Benoit 등, 1982). 오존에 대한 내성을 구명하기 위하여 연구 초기에는 제어된 환경 내에서 chamber를 이용하여 수종간 반응을 비교하는 수준이었으나, 점차 발전하여 동일 수종 내에서도 가계간이나 클론간(Simini 등, 1992; Davis와 Skelly, 1992; Guidi 등, 2001)에 내성의 차이가 확인되었다. 최근에는 이러한 오존에 대한 내성차이의 메커니즘을 구명하기 위한 생리적, 유전적 접근이 시도되고 있다(Fredericksen 등, 1996; Thiec와 Manninen, 2003). 목재의 부가가치가 높은 일부 수종에서는 오존의 피해를 극복하기 위하여 채종원에서 클론간 피해를 조사하고, 그 결과에 따라 내성클론의 종자만을 보급하는 연구가 수행되었으며(Lee 등, 1999), 가시적 피해의 유전력을 검정하여 내성품종육성의 가능성을 제시하기도 하였다(Lee 등, 2002).

반면 오존 농도가 날로 증가하고 있는 우리나라에서도 오염원이 밀집된 지역뿐만 아니라 오존의 이동특성상 산림지역에도 피해가 예상되고 있으나, 현실적으로 일부 수종에 대해서만 실내 연구가 진행되고 있을 뿐, 저항 메커니즘을 구명하고 내성품종을 육성하기 위한 기초 자료 미흡으로 체계적인 연구가 시급한 현실이다(이재천 등, 2001; 박은희 등, 2002; 우수영 등, 2004).

본 연구의 목적은 우리나라 주요 경제수종인 소나무를 대상으로 100 ppb 오존에서 5개월간 처리 후, 잎의 가시적 피해와 근원경 생장 및 건중량 등으로 오존에 대한 내성과 민감성 가계를 선발하여 금후 감수성 기작을 구명하기 위한 기초 자료를 확보하는데 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

본 연구에 사용한 재료는 국립산림과학원 산림종자연구소 안면도 채종원에서 채취한 90가계의 품매 종자를 온실에서 파종하였다. 발아 후 펠라이트와 피트모스를 1:1(v/v)로 혼합한 배양토를 채운 2l 포트에 이식하여 가계 당 50본씩 총 4500본(50본/가계×90가계)을 환경제어실내의 자연광 온실에서 양묘하였다. 온실 내에서 온도 25±2°C와 습도 70±10% 조건을 유지하며 오존처리 전까지 포트의 상태에 따라 관수를 하였다.

### 2. 오존처리

오존처리 1주일 전 생장과 활력이 유사한 개체를 가계 당 20본씩 총 1,800본(20본/가계×90가계)을 선별한 후 처리구별로 각각 900본(10본/가계×90가계)을 생장상으로 옮겨 인공광에서 순화과정을 거쳤다. 생장상은 walk-in type으로 16.2 m<sup>3</sup>(3 m×3 m×1.8 m)인 인공광형실로 처

리기간 중 450 μmol/m<sup>2</sup>/s의 광조건과 온도 25±1°C, 습도 70±5%를 유지하였다. 오존처리는 무처리구와 우리나라 대기환경의 한시간 기준값인 100 ppb 처리구로 하였으며, 처리기간 중 실측값은 무처리구는 5 ppb 이하의 농도를 보였으며, 처리구에서는 ±5 ppb 내외의 오차를 보였다. 오존처리는 오전 9시부터 오후 5시까지 하루 8시간씩 4월 1일부터 8월 30일까지 5개월간 계속하였으며, 국립산림과학원 산림유전자원부의 환경제어실내 오존처리 시설을 이용하여 수행하였다(이재천 등, 2001).

## 3. 피해조사

### 1) 잎의 가시적 피해

5개월 간 처리가 끝난 후 침엽수종에서 오존피해의 대표적인 증상인 잎 표면에 발현하는 chlorotic mottle 증상을 6개의 등급(0=none, 1=1-6%, 2=7-25%, 3=26-50%, 4=51-75%, 5=76-100%)으로 나누어 모든 개체를 조사하였다(Duriscoe 등, 1996).

### 2) 생장조사

근원경 생장은 처리가 끝난 후 생장량을 측정하여, 무처리구에 대한 처리구 생장의 증감 비율을 조사하였으며, 건중량은 잎, 줄기, 뿌리로 나누어 90°C에서 2일간 건조 후 무게를 측정하였으며, 무처리구에 대한 처리구 무게의 증감 비율을 조사하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 잎의 가시적 피해

무처리구에서는 피해가 없는 반면, 100 ppb 오존 처리구내의 모든 개체에서 가시적 피해증상이 발견되었다. 피해정도는 가계간에 큰 차이를 보여 90가계 중 피해가 가장 적은 충북 2호는 0.9%인데 반하여 피해가 많은 강원 46호는 28.3%를 보여 오존에 대한 반응이 가계간에 다양하게 나타났다. 총 90가계를 chlorotic mottle 피해를 순위 에 따라 1-20위는 상위, 40-50위는 중간, 70-90위는 하위로 나뉘어 각 그룹간 피해를 비교한 결과 그룹간 유의성이 확인되었다(Figure 1). 내성그룹 20가계 중 충북 2호, 강원 74호, 강원 15호, 강원 27, 충남 2호등의 피해율이 낮아 그룹 내에서도 내성가계로 나타났다. 내성 그룹 20가계의 전체 피해율은 평균 1.9%로 낮은 피해율을 보였다. 중간그룹 20가계의 평균 피해율은 5.3%로 내성그룹에 비하여 다소 증가하는 경향을 보였다. 민감성그룹 20가계에서는 강원 46호, 강원 29호, 강원 72호, 강원 86호, 강원 23호 등이 상대적으로 민감하였으며 그룹전체 피해율은 15.2%로 동일 수종 내에서도 가계간 오존에 대한 가시적 피해에 큰 차이를 보였다.

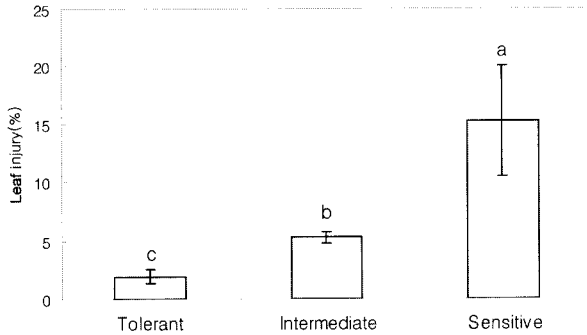


Figure 1. Comparison of the leaf injury among tolerance, intermediate and sensitive groups of *P. densiflora* exposed to 100 ppb ozone for five months. Each data point represents mean  $\pm$  SD. The different letters indicate significant difference among groups at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

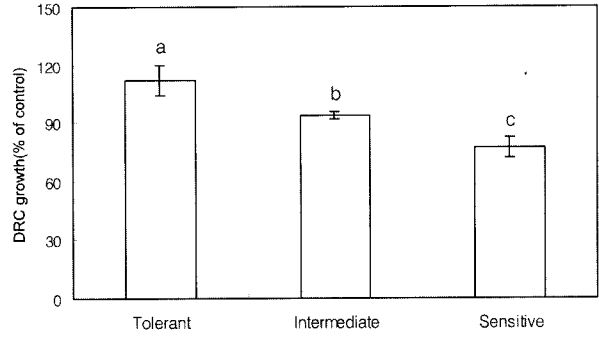


Figure 2. Relative DRC growth among tolerance, intermediate and sensitive groups of *P. densiflora* exposed to 100 ppb ozone for five months. Each data point represents mean  $\pm$  SD. The different letters indicate significant difference among groups at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

오염물질에 의한 가시적인 피해는 오염원의 농도뿐 아니라 다양한 인자들의 상호작용에 의하여 나타나는 내성 반응의 중요한 지표로 활용되어 왔다. 이와 같이 가시적 피해의 차이를 조사한 연구에서 Weir(1977)는 제어된 환경을 이용하여 오존에 의한 *Pinus taeda* 잎의 가계간 가시적 피해(chlorosis) 차이는 유전적인 변이로 보고하였다. 그 후 내성개체를 선발하여 육종에 활용하기 위하여 내성 유전자형을 탐색하기 위한 연구가 *Pinus taeda*를 중심으로 활발히 수행되었으며, 최근에는 수종도 다양화되고 있다 (Ward, 1980; Kress 등, 1982; Taylor, 1994; Wulff 등, 1996). 또한 우량한 종자를 보급하기 위한 현지 채종원에서 오존에 의한 피해정도를 조사한 결과 클론간 유의성을 보였으며(Lee 등, 1999), 그 차대들을 대상으로 실내에서 오존농도와 처리기간에 따라 피해율의 유전력을 조사한 결과에서도 유전력이 높은 것으로 확인되었다(Lee 등, 2002).

## 2. 근원경 성장

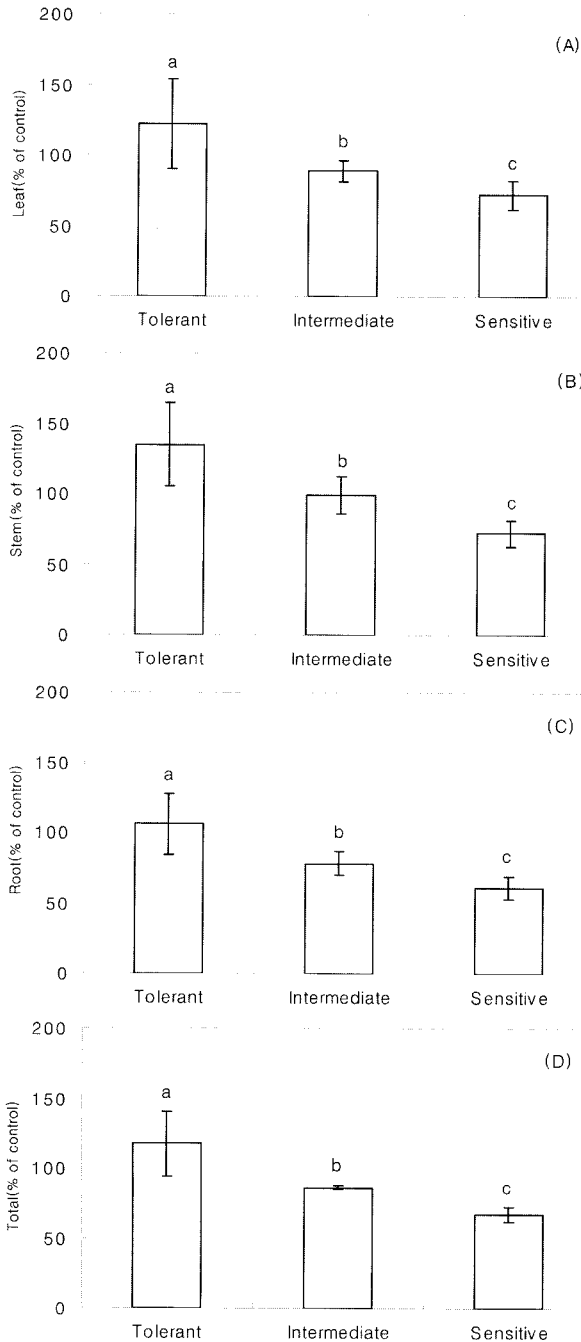
오존 처리에 의한 근원경 성장의 반응을 검정하기 위하여 오존 처리구의 성장량을 대조구의 성장량으로 나누어 성장비를 구하였다. 전체 90가계 중 71%인 64가계가 대조구에 비하여 처리구의 성장이 감소하였다. 성장반응에 따라 가시적 피해조사에서와 같이 20가계를 한 그룹으로 내성, 중간, 민감성 등 3개의 그룹으로 나눈 결과, 그룹간에 유의성을 보였다(Figure 2). 내성그룹은 강원 4호, 강원 73호, 강원 58호, 강원 27호, 강원 71호 등으로 오존처리에 도 성장이 감소하지 않아 대조구에 비하여 12%의 성장효과를 보였다. 반면, 민감성 그룹은 23%의 성장감소를 보였으며 강원 83호, 강원 41호, 경북 27호, 강원 40호, 강원 62호 등이다. 이와 같이 그룹간에 상이한 반응을 보이는 것은 오존처리에 의한 식물의 반응은 먼저 생리적인

장애에 이어 가시적인 피해를 유발하고 그 결과 성장반응으로 나타나므로 단기간의 연구에서는 같은 수종에서도 실험조건에 따라 다양한 결과를 보인다. *Pinus taeda* 1년생에 대하여 Horton 등(1990)은 60 ppb 오존에 2달간 처리한 결과 성장에 변화가 없다고 하였으나, Kress와 Allen(1991)은 동일 수종을 2년간 60-388 ppb 오존에 처리한 결과 40%의 성장감소가 나타난 것으로 보고하였다.

환경을 제어하는 실내가 아닌 산림 내에서 특정 수종을 대상으로 오존에 대한 영향을 평가하는 데는 임분 내의 많은 요인들의 변화에 의하여 어려움이 있으나, 가시적 피해와 성장 간에 상호작용을 이해하기 위한 연구에서 30년이 경과한 후 피해가 있는 개체들이 피해가 없는 개체보다 줄기생장에서 28%의 저조한 성장을 보였다(Vollenweider 등, 2003).

## 3. 건중량

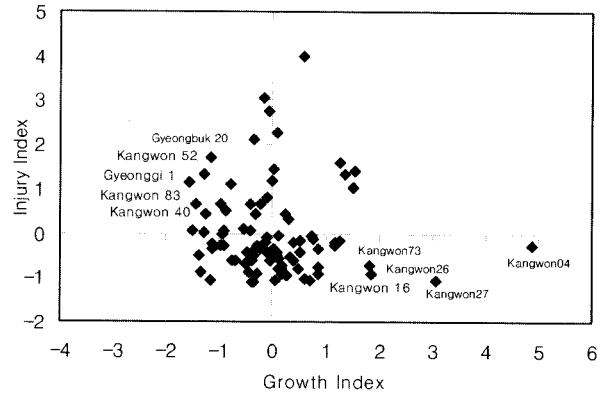
잎, 줄기, 뿌리로 나누어 조사하였으며 총건중량을 기준으로 3개의 그룹으로 나누었다. 전체 90가계 중 82%인 74가계의 건중량이 감소하였다. 내성그룹은 대조구에 비하여 처리구에서 17%의 증가를 보였다. 내성그룹은 강원 4호, 강원 27호, 강원 39호, 강원 26호, 강원 09호 등이었으나 그 중 강원 39호는 전체 건중량은 증가하였으나 뿌리부분은 내성그룹에 속하지 못하였다. 민감한 그룹에서는 경기 1호, 경북 20호, 강원 17호, 강원 52호, 충북 1호가 대표적이며 그룹전체에 대하여 33%의 감소율을 보였으며, 각 수체 부위별 건중량비와 총건중량비에서 그룹간 통계적인 유의성이 인정되었다. 수체부위별 반응으로 내성 그룹에서는 대조구에 비하여 잎이 26%, 줄기가 38% 증가한 반면, 뿌리부분은 8%의 증가만을 보였으며, 민감성 그룹에서는 잎과 줄기가 30% 감소한 반면 뿌리 부분에서는 42%의 감소율을 보여 뿌리부분이 가장 민감한 반응을 보



**Figure 3. Relative dry weight of leaf(A), stem(B), root(C), and total(D) among tolerance, intermediate and sensitive groups of *P. densiflora* exposed to 100 ppb ozone for five months. Each data point represents mean  $\pm$ SD. The different letters indicate significant difference among groups at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.**

인 것으로 나타났다(Figure 3).

오존에 대한 반응은 성장과 더불어 건중량의 변화도 중요한 지표로 활용되고 있다. 북아메리카에서는 테다소나무에 대한 연구가 활발하여 수종간이나 가계간의 변이에 관한 연구뿐 아니라 건중량의 감소도 보고되었다(Edwards 등, 1991; Shafer 등, 1993; Barbo 등, 2002). 유럽에서는



**Figure 4. Injury index and growth index of *P. densiflora* exposed to 100 ppb ozone for five months.**

그 지역의 주요수종인 독일가문비나무와 펜들라자작나무에 대한 연구가 주를 이루었다. 독일가문비나무는 오존에 민감한 반응을 보이는 수종으로 두 번의 성장 기간동안 오존 처리로 통계적인 유의성은 없었으나 biomass의 감소를 보였으며(Braun와 Fluckiger, 1995; Landolt 등, 2000), 또 다른 연구에서는 4번의 성장 기간동안 처리로 8%와 5%의 감소결과를 보고하였다(Karlsson 등, 2002; Ottosson 등, 2003). 펜들라자작나무에서도 120 ppb 처리구의 총건중량이 대조구인 대기중의 농도에 비하여 22%의 성장 감소를 나타낸 것으로 보고되었다(Karlsson 등, 2003).

#### 4. 내성가계 선발

오존에 대한 내성정도를 구분하기 위하여 각 측정값에 대하여 표준화지수 공식을 이용한 잎의 가시적 피해를 표준화한 피해지수와 근원경과 건중량 성장을 표준화한 성장지수를 구하여 분포도를 작성하였다(Figure 4). 상대적으로 가시적 피해가 적고 오존처리에도 성장의 감소율이 낮은 강원 4, 16, 26, 27, 73호가 내성 가계로 나타났고, 피해율이 높고 성장의 감소율이 높은 강원 40, 52, 83, 경기 1, 경북 20호 등이 민감한 가계로 나타났다.

오염물질에 대한 수목의 적응능력이 다양하리라는 사실에 관심이 모아지면서 이러한 사실을 구명하기 위하여 Steiner와 Davis(1979)가 물푸레나무류의 천연집단을 대상으로 한 연구에서 오존에 대한 반응이 유전적으로 다르다는 사실을 보고 하였고, 포플러 집단에 관한 연구(Karnosky, 1977; Berrang 등, 1991)에서도 확인되었다. 또한 산지간 변이뿐만 아니라 산지 내에서도 변이가 다양하여 산지선발과 아울러 산지내 가계선발을 병행함으로써 오존에 내성을 가진 개체의 육종가능성이 제시되었다(Taylor, 1994).

한편 주요 경제수종인 *Pinus taeda*는 Weir(1977)가 유전적인 변이를 보고한 이후, 내성개체를 선발하여 육종에 활용하기 위하여 내성 유전자형을 탐색하기 위한 연구가 활

발히 수행된 바 있다(Kress 등, 1982).

오염원에 대한 내성개체를 선발하는 데는 현지에서 직접 선발하는 것이 가장 이상적이다 하지만, 자연 상태에서는 유전형질이나 환경인자 또는 두 요인간 상호작용의 상대적 의미를 확증하기에 어려움이 있어 선발의 제한요인으로 작용하였으나, 최근 제어된 환경에서 오존을 처리할 때는 표현되는 변이 중 유전형질이 가장 중요한 인자라고 밝혀졌다(Taylor, 1994).

이와 같이 오존에 의한 수목의 반응은 유전적인 지배를 받는다는 사실이 많은 연구결과에서 보고되었다. 본 연구에서도 우리나라 주요 경제수종인 소나무에서 내성가계와 민감성 가계간 변이를 보여 내성가계 선발의 가능성을 확인할 수 있었다.

## 인용문헌

- 박은희, 김종갑, 이재천, 한심희. 2002. 오존에 노출된 덩굴식물류, 쇠뜨기, 쪽의 광색소 함량과 SOD 활성 변화. 한국농림기상학회지 4 : 159-163.
- 우수영, 이성환, 권기원, 이재천, 최정호. 2004. 오존 스트레스에 대한 몇 수종의 생장, 광합성, ascorbate peroxidase 활성 반응. 한국임학회지 93 : 409-414.
- 이재천, 김인식, 여진기, 구영본. 2001. 잎의 가시적 피해에 따른 오존에 대한 미루나무(*Populus deltoides*) 클론간 감수성 비교. 한국임학회지 90 : 10-18.
- Barbo, D.N., A.H. Chappelka, G.L. Somers, M.S. Miller-Goodman, and K. Stolte. 2002. Ozone impacts on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) grown in a competitive environment. Environmental Pollution 116 : 27-36.
- Berrang, P., D.F. Kamosky, and J.P. Bennett. 1991. Natural selection for ozone tolerance in *Populus tremuloides*: an evaluation of nationwide trends. Canadian Journal of Forest Research 21 : 1091-1097
- Berry, C.R. and Ripperton, L.A. 1963. Ozone, a possible cause of white pine emergence tipburn. Phytopathology 53 : 552-557.
- Benoit, L.F., M.J. Skelly, L.D. Moore, and L.S. Dochinger. 1982. Radial growth reductions of *Pinus strobus* L. correlated with foliar ozone sensitivity as an indicator of ozone-induced losses in eastern forests. Can. J. For. Res. 12 : 673-678.
- Braun, S. and W. Fluckiger. 1995. Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* L. *Picea abies* (L.) Karst. New Phytologist 129 : 33-44.
- Davis, D.D. and J.M. Skelly. 1992. Foliar sensitivity of eight eastern hardwood tree species to ozone. Water, Air, and Soil Pollution 62 : 269-277.
- Duriscoe, D., K. Stolte, and J. Pronos. 1996. Establishment of monitoring plots and evaluation of trees injured by ozone. *Evaluating Ozone Air Pollution Effects on Pines in the Western United States*. Miller, P.R., K.W. Stolte, D.M. Duriscoe and J. Pronos (Eds.), USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-155 : 35-55.
- Edwards, G.S., N.T. Edwaeds, J.M. Kelly, and P.A. Mays. 1991. Ozone, acidic precipitation, and soil Mg effects on growth and nutrition of loblolly pine seedlings. Environmental and Experimental Botany 31 : 67-78.
- Fredericksen, T.S., J.M. Skelly, K.C. Steiner, T.E. Kolb and K.B. Kouterick. 1996. Size-mediated foliar response to ozone in black cherry trees. Environmental Pollution 91 : 53-63.
- Guidi, L., C. Nali, G. Lorenzini, F. Filippi and G.F. Soldatini. 2001. Effect of chronic ozone fumigation on the photosynthetic process of poplar clones showing different sensitivity. Environmental Pollution, 113 : 245-254.
- Hayes, E.M. and J.M. Skelly. 1977. Transport of ozone from the northeastern United States into Virginia and its effects on eastern white pine. Plant Diseases Report 61 : 778-782.
- Horton, S.J., R.A. Reinert, and W.W. Heck. 1990. Effects of ozone on three open-pollinated families of *Pinus taeda* L. grown in two substrates. Environmental Pollution 65 : 279-292.
- Karlsson, P.E., E.L. Medin, G. Selldèn, G. Wallin, S. Ottosson, H. Pleijel, and L. Skärby. 2002. Impact of ozone and reduced water supply on the biomass accumulation of Norway spruce saplings. Environmental Pollution 119 : 237-244.
- Karlsson, P.E., Uddling, J., Skärby, L., Wallin, G. and Sellden, G. 2003. Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) saplings. Environmental Pollution 124 : 485-495.
- Kamosky, D. F. 1977. Evidence for genetic control of response to sulfur dioxide and ozone in *Populus tremuloides*. Canadian Journal of Forest Research 7 : 437-440.
- Kress, L.W. and H.L. Allen. 1991. Impact of ozone and acidic precipitation on the growth of loblolly pine seedlings. p. 1-10. In Annual Meeting of Air Pollut. Control Assoc., 84th. Vancouver, BC. 16-21 June 1991.
- Kress, L.W., J.M. Skelly, and K.H. Hinkelmann. 1982. Relative sensitivity of 18 full-sib families of *Pinus taeda* to O<sub>3</sub>. Can. J. for. Res. 12 : 203-209.
- Landolt, W., P. Bühlmann, P. Bleuler, and J.B. Bucher. 2000. Ozone exposure-response relationships for biomass and root/shoot ratio of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*), Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). Environmental Pollution 109 : 473-478.
- Lee, J.C., J.M. Skelly, K.C. Steiner, J.W. Zhang and J.E. Savage. 1999. Foliar response of black cherry(*Prunus serotina*) clones to ambient ozone exposure in central Pennsylvania. Environmental Pollution 105 : 325-331.
- Lee, J.C., K.C. Steiner, J.W. Zhang and J.M. Skelly. 2002.

- Heritability of ozone sensitivity in open-pollinated families of black cherry (*Prunus serotina* Ehrh.). *Forest Science* 48 : 111-117.
24. Ottosson, S., G. Wallin, L. Skärby, P.E. Karlsson, E.L. Medin, M. Rantfors, H. Pleijel, and G. Selldén. 2003. Four years of ozone exposure in OTSs combined with high or low supply of phosphorus reduced biomass production in Norway spruce (*Picea abies*). *Trees* 17 : 299-307.
25. Shafer, S.R., R.A. Reinert, G. Eason, and S.E. Spruill. 1993. Analysis of ozone concentration-biomass response relationship among open-pollinated families of loblolly pine. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 706-715.
26. Skelly, J.M. 1980. Photochemical oxidant impact in mediterranean and temperate forest ecosystem: real and potential effects. In: *Proceedings of the symposium on effects of air pollutants in mediterranean and temperate forest ecosystems*. June 22-27, Riverside, CA, 38-50.
27. Simini, M., J.M. Skelly, D.D. Davis and J.E. Savage. 1992. Sensitivity of four hardwood species to ambient ozone in north central Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research* 22 : 1789-1799.
28. Steiner, K.C. and D.D. Davis. 1979. Variation among Fraxinus Families in foliar response to ozone. *Canadian Journal of Forest Research* 9: 106-109.
29. Taylor Jr., G.E. 1994. Role of genotype in the response of loblolly pine to tropospheric ozone: Effects at the whole-tree, stand, and regional level. *J. Environ. Qual.* 23 : 63-82.
30. Thiec, D.L. and S. Manninen. 2003. Ozone and water deficit reduced growth of aleppo pine seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41 : 55-63.
31. Vollenweider, P., H. Woodcock, M.J. Kelty and R.M. Hofer. 2003. Reduction of stem growth and site dependency of leaf injury in Massachusetts black cherries exhibiting ozone symptoms. *Environmental Pollution* 125 : 467-480.
32. Ward, M.M. 1980. Variation in response of loblolly pine to ozone. M.S. thesis, Virginia Polytech. Inst. and State Univ. Blacksbug, VA.
33. Weir, R.J. 1977. Genetic variation in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) tolerance to ozone. Ph.D. thesis, North Carolina State Univ. Raleigh, NC.
34. Wulff, A., S. Anttonen, W. Heller, H. Sandermann Jr., and L. Kärenlampi. 1996. Ozone-sensitivity of scots pine and norway spruce from northern and local origin to long-term open-field fumigation in central Finland. *Environmental and Experimental Botany* 36 : 209-227.

---

(2005년 3월 24일 접수; 2005년 5월 6일 채택)